



## طراحی میراگر جرمی تنظیم شده‌ی نیمه‌فعال با سختی متغیر برای سازه‌های غیرخطی

محتشم محبی\*، سینا بخشی نژاد

دانشگاه محقق اردبیلی، گروه مهندسی عمران، اردبیل، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۱ بهمن ۱۳۹۲  
بازنگری: ۲۹ شهریور ۱۳۹۴  
پذیرش: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۳۰ مرداد ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

میراگر جرمی تنظیم شده‌ی نیمه‌فعال با سختی متغیر، سازه‌های غیرخطی، الگوریتم کنترلی بهینه‌ی برشی، الگوریتم کنترلی تعادل اصلاح شده، الگوریتم ژنتیک

**چکیده:** در این مقاله به طراحی مکانیزم میراگر جرمی تنظیم شده‌ی نیمه‌فعال با سختی متغیر برای کاهش پاسخ سازه‌های غیرخطی تحت اثر زلزله پرداخته شده است. تنظیم پارامتر سختی در هر لحظه، بر اساس دو الگوریتم کنترلی نیمه‌فعال توسعه یافته‌ی متناسب با رفتار سازه‌های غیرخطی شامل (۱) کنترل بهینه‌ی آنی و قانون کنترل برشی و (۲) کنترل تعادل اصلاح شده صورت گرفته است. برای تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای سیستم کنترل نیمه‌فعال (شامل ماتریس‌های وزنی در تابع عملکرد الگوریتم کنترل نیمه‌فعال و مقادیر حداقل و حداکثر سختی) یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با تابع هدف حداقل کردن حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه تعریف و با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. برای آنالیز عددی یک قاب ساختمانی هشت طبقه‌ی برشی با رفتار دوخطی هیستریسیس انتخاب و به طراحی مکانیزم کنترل نیمه‌فعال تحت اثر اغتشاش سفید پرداخته شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که مکانیزم کنترل نیمه‌فعال طراحی شده بر اساس دو الگوریتم‌های کنترلی، عملکرد مشابه و مناسبی در کاهش حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه‌های غیرخطی داشته است. همچنین بررسی کارایی میراگر جرمی نیمه‌فعال با سختی متغیر تحت ارتعاش طراحی و تحریکات لرزه‌ای با محتوای فرکانسی متفاوت نشان می‌دهد که این مکانیزم در کاهش پاسخ سازه با رفتار غیرخطی، موثرتر از سیستم غیرفعال و نیمه‌فعال با میرایی متغیر می‌باشد.

ندارند. بنابراین از قابلیت اعتماد بالایی برخوردارند [۱].

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال با تغییر در پارامتر سختی یا میرایی سازه، پاسخ‌های آن را تحت تحریکات جانبی نظیر زلزله و باد کاهش می‌دهند. میراگر جرمی تنظیم شده<sup>۱</sup> یکی از مکانیزم‌های کنترل غیرفعال می‌باشد که در سال‌های اخیر برای کاهش پاسخ‌های سازه تحت اثر نیروهای دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است. این مکانیزم نسبت به فرکانس‌های تنظیمی حساس بوده و عملکرد آن به علت پارامترهای ثابت و غیرقابل تغییر محدود می‌باشد [۲]. این محدودیت TMD می‌تواند با مکانیزم میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه<sup>۲</sup> بر اساس تنظیم فرکانس‌های طبیعی تعداد زیادی از TMD ها که در محدوده فرکانس طبیعی سازه اصلی توزیع می‌شوند تا حدودی بر طرف شود. برای سازه‌های تحت اثر زلزله‌های متوسط و شدید که رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهند، تغییرات در سختی و میرایی سازه و یا عدم قطعیت در تخمین پارامترهای TMD ممکن است موجب نامیزان شدن آن گردد که کاهش کارایی آن را در پی خواهد داشت. به همین دلیل کارایی موثر TMD در برابر هر نوع تحریک خارجی در سازه‌های غیرخطی قطعیت

### ۱- مقدمه

کنترل پاسخ سازه‌ها در برابر نیروهای دینامیکی با استفاده از سیستم‌های کنترل سازه در طی سالیان اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال مزایای سیستم‌های کنترلی غیرفعال و فعال را برای کاهش پاسخ‌های سازه با هزینه‌ی اضافی کمی در مقایسه با سیستم‌های کنترلی غیرفعال دارا می‌باشند و می‌توانند به طور بالقوه به اکثر عملکرد سیستم‌های فعال دست یابند. سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال می‌توانند تطبیق‌پذیری و سازگاری سیستم‌های کنترل فعال و هیبریدی را بدون نیاز به منبع انرژی بزرگ فراهم کنند و در واقع بسیاری از آن‌ها می‌توانند با منبع انرژی الکتریکی ذخیره‌ی ناچیزی، در حدود ده‌ها وات عمل کنند. همچنین در صورت وقوع لرزش‌های بسیار شدید که ممکن است منبع انرژی اصلی سازه از دست برود، می‌توانند به عنوان سیستم‌های غیرفعال به کنترل پاسخ‌های سازه ادامه دهند. علاوه بر این برخلاف سیستم‌های کنترل فعال، مکانیزم‌های کنترل نیمه‌فعال در صورت عدم عملکرد درست بدلیل وارد نیابردن مستقیم نیروی کنترلی به سازه، پتانسیل ناپایدار کردن سازه را

<sup>1</sup> Tuned Mass Damper (TMD)

<sup>2</sup> Multiple Tuned Mass Damper (MTMD)

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mohebbi@uma.ac.ir

نداشته و عملکرد آن وابسته به محتوای فرکانسی رکورد ارتعاش خارجی می‌باشد. بنابراین با توجه به محدودیت‌های میراگر جرمی تنظیم شده‌ی غیرفعال نظیر دامنه فرکانسی محدود و امکان نامیزان شدن، روش‌های کنترل فعال یا نیمه‌فعال برای بهبود عملکرد این سیستم مورد استفاده قرار گرفته است نظیر میراگر جرمی فعال<sup>۱</sup> که توسعه یافته و به طور وسیعی برای کنترل فعال ساختمان‌ها و پل‌ها به کار رفته‌اند [۳،۴]. میراگرهای جرمی فعال علی‌رغم عملکرد موثرتر نسبت به حالت غیرفعال به یک منبع بزرگ تولید کننده انرژی خارجی نیاز دارند که ممکن است به هنگام وقوع زلزله‌های شدید در دسترس نباشد. بنابراین مکانیزم میراگر جرمی تنظیم شده‌ی نیمه‌فعال<sup>۲</sup> که در آن از ابزارهایی با میرایی یا سختی قابل کنترل استفاده می‌شود، پیشنهاد شده است. در این نوع مکانیزم به جای اعمال مستقیم نیرو مثل کنترل فعال، نیروهای کنترلی به وسیله‌ی تغییر در سختی یا میرایی وسیله‌ی کنترل ایجاد می‌شوند.

مزیت اصلی مکانیزم SATMD، کاهش مناسب پاسخ سازه در حد ATMD با نیاز به منبع انرژی خارجی ناچیز، می‌باشد. یک پژوهش وسیع در رابطه با TMDهای غیرفعال، نیمه‌فعال و فعال توسط سون و همکاران [۵] صورت گرفت. نتایج این تحقیق حاکی از آن بود که کارایی SATMD در کنترل ارتعاش سیستم موثرتر از TMD و در حد ATMD، بوده است. همچنین کارایی این مکانیزم توسط هروات و همکاران [۶]، آبه و همکاران [۷] و آبه و ایگوینا [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات صورت گرفته موید عملکرد مناسب‌تر SATMD نسبت به TMD می‌باشد. بسیاری از ابزارهای نیمه‌فعال نظیر میراگرهای اریفیس متغیر، میراگرهای اصطکاکی و یا میراگرهای مایع مغناطیسی یا الکتریکی برای تنظیم میرایی مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم‌های سختی متغیر با حالت باز-بسته توسط کوبوری و تاکاهاشی [۹]، بایرو و همکاران [۱۰] و یانگ و همکاران [۱۱] توسعه یافته است. ابزار تنظیم سختی<sup>۳</sup> SAIVS با قابلیت تعویض مداوم و پیوسته سختی توسط ناگاراچایا و میت [۱۲] ابداع شده که با استفاده از آن یک میراگر جرمی تنظیم شده‌ی نیمه‌فعال با سختی متغیر توسط ناگاراچایا و واراداراجان [۱۳] توسعه پیدا کرد. این مکانیزم SATMD مزیت تنظیم مداوم و پیوسته پارامتر سختی در هر لحظه را فراهم کرده و بنابراین هنگام تغییر در میرایی و سختی سازه‌ی اصلی به دلیل خرابی همچنان مقاوم می‌باشد. واراداراجان و ناگاراچایا [۱۴،۱۵] عملکرد مکانیزم SATMD را با تنظیم لحظه‌ای پارامتر سختی بر اساس الگوریتم‌های کنترلی بر اساس تجزیه‌ی مود تجربی-تبدیل هیلبرت و تبدیل فوریه‌ی کوتاه در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش‌ها همچنین نشان داده شده که مکانیزم SATMD در کاهش پاسخ سازه‌های تحت تحریک

<sup>1</sup> Active Mass Damper (AMD)

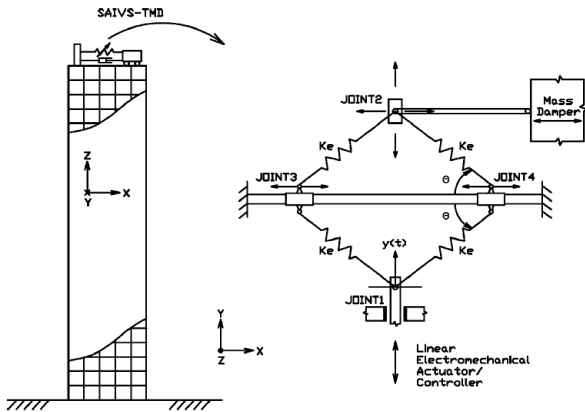
<sup>2</sup> Semi-Active Tuned Mass Damper (SATMD)

<sup>3</sup> Semi-Active Independent Variable Stiffness (SAIVS)

باد موثر است. علاوه بر این با در نظر گرفتن عدم قطعیت برای سختی سازه نشان داده شد که این مکانیزم در صورت تغییر در سختی سازه نیز همچنان موثر است. ناگاراچایا و سونمز [۱۶] کاربرد میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه نیمه‌فعال<sup>۴</sup> با سختی متغیر را در کاهش پاسخ سازه تحت تحریکات لرزه‌ای متفاوت مورد بررسی قرار دادند که در این پژوهش نیز برای تنظیم سختی TMDها از یک الگوریتم کنترلی بر پایه‌ی تبدیل فوریه‌ی کوتاه استفاده شد. مطالعات در زمینه SATMD با سختی متغیر با بهره‌گیری از ابزار نیمه‌فعال SAIVS، قابلیت این مکانیزم را برای تنظیم مداوم و قابل اعتماد پارامتر سختی میراگر جرمی به طور تحلیلی و آزمایشگاهی تایید می‌کند [۱۷]. تحقیقات صورت گرفته در زمینه SATMD مجهز به SAIVS تاکید می‌کند این مکانیزم کنترلی تحت تحریکات ایستا و غیراستا عملکرد موثری هم‌تای ATMD ولیکن با انرژی مورد نیاز کمتر، از خود نشان می‌دهد [۱۷-۱۴]. سون و همکاران [۱۸] از ترکیب SATMD با سختی متغیر با یک TMD غیرخطی ترکیب مناسبی را برای کاهش موثر پاسخ گذرا و ماندگار سیستم ارتعاشی پیشنهاد دادند. ایسون و همکاران [۱۹] از ترکیب SATMD با سختی متغیر به صورت سری با TMD غیرخطی برای کاهش پاسخ‌های سازه‌ی بهره گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که SATMD با دامنه حرکت چهار برابر کوچکتر از سیستم اصلی قادر به کاهش قابل ملاحظه تغییر مکان سیستم اصلی گردیده است. سون و ناگاراچایا [۲۰] مکانیزم SATMD با سختی و میرایی متغیر برای کنترل سازه تحت زلزله‌های دورگسل و نزدیک‌گسل مورد استفاده قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان دهنده این مطلب بود که SATMD بر خلاف TMD که به دلیل خرابی سازه از حالت تنظیم خارج شده، همچنان موفق به کنترل مناسب پاسخ‌های سازه گردیده است.

با توجه به محدود بودن بررسی‌ها در خصوص کاربرد این مکانیزم در سازه‌های غیرخطی و با توجه به رفتار واقعی سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های شدید که عموماً وارد ناحیه غیرخطی می‌شوند و همچنین با توجه به قابلیت موجود در مکانیزم SATMD به لحاظ کاربردی، در این مقاله به بررسی نحوه‌ی طراحی و ارزیابی کارایی این مکانیزم نیمه‌فعال، در سازه‌های غیرخطی پرداخته می‌شود. الگوریتم‌ها و روش‌های متعددی برای کنترل نیمه‌فعال پیشنهاد شده است، که برخی از آنها از تغییر و اقتباس قوانین و الگوریتم‌های کنترل فعال بدست آمده و برخی دیگر مستقیماً از ملاحظات فیزیکی سیستم نشات می‌گیرند. اکثر الگوریتم‌های پیشنهادی برای استفاده در مکانیزم SATMD با میرایی متغیر بوده و برای سازه‌ها با رفتار خطی توسعه یافته است و تئوری‌های کنترل سازه‌های با رفتار غیرخطی و غیرالاستیک محدود می‌باشد. با توجه به اینکه این مطالعه بر روی سازه‌های با رفتار غیرخطی صورت می‌گیرد بنابراین بایستی الگوریتم

<sup>4</sup> Semi-Active Multiple Tuned Mass Damper (SAMTMD)



شکل ۱: سازه‌ی مجهز به SATMD با سختی متغیر [۱۴]

Fig.1. Structure equipped with variable stiffness SATMD

خصوصیت بارز این ابزار توانایی تعویض مداوم و هموار پارامتر سختی می‌باشد. این ابزار متشکل از چهار المان فنر که در یک صفحه‌ی لوزی شکل که با مفصلی در رئوس به هم متصل شده‌اند، می‌باشد. یک محرک الکترومکانیکی خطی که از سیستم کنترلی دستور می‌گیرد، وضعیت قرار گرفتن این فنرها را جهت رسیدن به سختی و در نتیجه نیروی مورد نظر تغییر می‌دهد. بنابراین با فرض رفتار خطی برای ابزار نیمه‌فعال، نیروی سختی متغیر در هر لحظه به صورت زیر می‌باشد:

$$f_s(t) = k(t) \times x_{tmd}(t) \quad (1)$$

که  $k(t)$  پارامتر سختی وابسته به زمان بوده که با توجه به زاویه فنرها در ابزار SAIVS بین دو مقدار حداقل و حداکثر تغییر می‌کند:

$$k_{min} \leq k(t) \leq k_{max} \quad (2)$$

در رابطه‌ی ۱،  $x_{tmd}(t)$  تغییر مکان جانبی نسبی میراگر جرمی می‌باشد. جهت تعیین  $k(t)$  در هر گام زمانی از الگوریتم‌های کنترل نیمه‌فعال استفاده می‌شود.

### ۳- بررسی معادلات حرکت سازه با رفتار غیرخطی مجهز به مکانیزم SATMD با سختی متغیر

معادله‌ی ارتعاشی حرکت سازه‌ی  $n$  درجه آزادی با رفتار غیرخطی و از نوع قاب برشی، مجهز به مکانیزم SATMD که در طبقه‌ی آخر قرار گرفته است تحت ارتعاش پایه‌ی  $\ddot{X}_g$ ، به صورت رابطه‌ی زیر می‌باشد:

$$M\ddot{X}(t) + F_D(\dot{X}(t)) + F_s(X(t)) = Df_s(t) + Me\ddot{X}_g \quad (3)$$

در رابطه‌ی ۳،  $\dot{X}(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$ ،  $\ddot{X}(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$  و  $\ddot{X}_g(x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$  به ترتیب بردارهای تغییر مکان، سرعت و شتاب سیستم سازه - SATMD می‌باشند.

بردار محل نیروهای کنترلی اعمال

شده توسط ابزار نیمه‌فعال و  $e^T = [-1, -1, \dots, -1]_{1 \times (n+1)}$  بردار انتقال

نیمه‌فعال مناسب برای این گونه از سازه‌ها استفاده گردد. در این میان الگوریتم بهینه‌ی برشی پیشنهاد شده توسط هروات [۶] برای استفاده در SATMD و توصیه شده توسط دایک [۲۱] برای کاربرد در میراگرهای متغیر گزینه مناسبی می‌باشد که کارایی این الگوریتم در طراحی SATMD در مطالعات پینکاو و فوجینو [۲۲] و جی و همکاران [۲۳] نشان داده شده است. در این مطالعه، جهت طراحی SATMD دو الگوریتم کنترل نیمه‌فعال جدید برای تنظیم سختی بر مبنای قانون کنترل برشی و کنترل تعادل اصلاح شده پیشنهاد شده است. قانون کنترل برشی از دو مرحله تشکیل می‌شود. در بخش اول، با فرض اینکه یک مکانیزم کنترل فعال ایده‌آل جهت کنترل وجود دارد، از الگوریتم بهینه‌ی آنی با استفاده از روش عددی نیومارک معرفی شده توسط چانگ و یانگ [۲۴] و توسعه یافته توسط جغتایی و محبی [۲۵] برای سازه‌های با رفتار غیرخطی و هیستریسیس<sup>۱</sup> با پسخور تغییر مکان، سرعت و شتاب، جهت تعیین نیروهای کنترلی مناسب استفاده شده است. در گام بعدی نیز مقادیر مناسب سختی میراگر جرمی در هر لحظه با استفاده از قانون کنترل برشی انتخاب می‌شود. الگوریتم کنترلی تعادل در ابتدا بر اساس ملاحظات فیزیکی سیستم در یک حالت باز-بسته توسط سیرتانو و همکاران [۲۶] برای تنظیم میرایی مطرح شده که در این پژوهش برای تنظیم پارامتر سختی میراگر جرمی اصلاح گردیده است. جهت بهینه‌سازی سیستم کنترل نیمه‌فعال و تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامتر سختی بر اساس هر یک از الگوریتم‌های کنترلی، یک مسئله بهینه‌سازی مجزا بر مبنای حداقل کردن حداکثر پاسخ سازه تعریف و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

در بخش‌های بعدی ابتدا به بررسی مکانیزم SATMD با استفاده از سختی متغیر پرداخته شده و معادلات ارتعاش سازه‌ی غیرخطی مجهز به مکانیزم SATMD، تحت اثر زلزله بیان گردیده است. سپس الگوریتم‌های کنترلی نیمه‌فعال پیشنهادی جهت طراحی SATMD برای سازه‌های با رفتار غیرخطی بر مبنای (۱) کنترل بهینه‌ی آنی و قانون کنترل برشی و (۲) تعادل اصلاح شده و نحوه‌ی بهینه‌سازی پارامترهای سیستم کنترل ارائه شده است. در نهایت تحلیل عددی بر روی سازه‌ی هشت طبقه‌ی غیرخطی انجام گرفته و نتایج گزارش شده است.

### ۲- مکانیزم SATMD با سختی متغیر

جهت رسیدن به مکانیزم SATMD بایستی از یک ابزار کنترل نیمه‌فعال (ابزار با سختی متغیر یا میرایی متغیر) استفاده شود. در این پژوهش، مکانیزم SATMD از طریق جایگزین کردن فنر غیرفعال مکانیزم TMD با ابزار نیمه‌فعال تنظیم سختی SAIVS [۱۲] تشکیل می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Hysteresis

#### ۴-۱-۱- تعیین نیروی کنترلی

نیروی سختی  $f_s(t)$  که ابزار نیمه فعال مکانیزم SATMD در هر گام زمانی تولید می کند برابر است با:

$$f_s(t) = k(t) \cdot x_{tmd} \quad , \quad x_{tmd} = x_{n+1} - x_n \quad (6)$$

که  $x_{tmd}$  تغییر مکان جانبی نسبی TMD نسبت به طبقه ی آخر و  $k(t)$  نیز سختی متغیر می باشد. در رابطه ی ۳ نیروی  $f_s(t)$  تولید شده توسط SATMD با نیروی کنترل فعال  $u(t)$  جایگزین شده و بدین ترتیب رابطه ی ۳ به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$M\ddot{X}(t) + F_D(\dot{X}(t)) + F_S(X(t)) = Du(t) + Me\ddot{X}_g \quad (7)$$

که در آن  $u(t)$  نیروی کنترل می باشد.

#### ۴-۱-۱-۱- تابع عملکرد سیستم کنترل فعال

تابع عملکرد سیستم کنترل فعال به صورت رابطه ی ۸ تعریف می شود که شامل ترمهای مربوط به تغییر مکان، سرعت، شتاب و همچنین نیروی کنترلی می باشد. ماتریس های  $Q_1, Q_2, Q_3$  و ماتریس های  $(n+1) \times (n+1)$  نیمه مثبت معین مربوط به جریمه ی پاسخ سازه و  $R_{m \times m}$  ماتریس مثبت معین مربوط به جریمه ی نیروی کنترلی می باشند که  $m$  نشان دهنده ی تعداد کنترل گر می باشد. از آنجایی که فقط یک مکانیزم SATMD در طبقه ی آخر سازه مورد استفاده قرار گرفته است، بنابراین ماتریس  $R$  یک پارامتر اسکالر خواهد بود.

$$J_k = \frac{1}{\gamma} (X_k^T Q_1 X_k + \dot{X}_k^T Q_2 \dot{X}_k + \ddot{X}_k^T Q_3 \ddot{X}_k + u_k^T R u_k) \quad (8)$$

نیروی کنترلی از کمینه سازی تابع عملکرد فوق به صورت رابطه ی ۹ تعیین می شود [۲۱].

$$u_k = -R^{-1} D^T K_{n_k}^{*-T} (Q_1 X_k + a_f Q_2 \dot{X}_k + a_1 Q_3 \ddot{X}_k) \quad (9)$$

اندیس  $-T$  به معنای ترانپوز شده ی معکوس یک ماتریس می باشد. پارامترهای معادلات فوق از روابط زیر بدست می آیند.

$$K_{n_k}^* = a_1 M + a_f C_{k-1}^* + K_{k-1}^* \quad (10a)$$

در این رابطه  $K_{n_k}^*$  ماتریس سختی تعمیم یافته در گام زمانی  $k$  ام،

$M$  ماتریس جرم،  $C_{k-1}^*$  ماتریس میرایی غیرخطی در گام  $1-k$  ام و  $K_{k-1}^*$  ماتریس سختی غیرخطی در گام  $1-k$  ام میباشد.

$$a_1 = \frac{1}{\delta(\Delta t)^2}; a_f = \frac{\gamma}{\delta \Delta t} \quad (10b)$$

$a_1$  و  $a_4$  ضرایب نیومارک،  $\delta$  و  $\gamma$  پارامترهای روش نیومارک می باشند که به منظور اطمینان از پایداری روش انتگرالگیری عددی

شتاب پایه می باشد. ماتریس جرم سیستم سازه-SATMD به صورت زیر است:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ \cdot & m_2 & \cdots & \cdot & \cdot \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdots & m_n & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & m_d \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (4)$$

که در آن  $m_d$  جرم میراگر می باشد.  $f_s(t)$  نیروی ایجاد شده توسط ابزار تنظیم سختی، به صورت زیر می باشد:

$$f_s(t) = k_d(t) \times (x_{n+1} - x_n) \quad (5)$$

که در آن  $t$  نشان دهنده ی زمان و  $k_d$  سختی متغیر می باشد که بر اساس الگوریتم کنترلی در هر لحظه تعیین می گردد.

در رابطه ی ۳،  $F_{D(n+1) \times 1}(\dot{X}(t))$  و  $F_{S(n+1) \times 1}(X(t))$  بردارهای مربوط به نیروی میرایی و نیروی مقاوم داخلی، به ترتیب به صورت تابعی از سرعت و تغییر مکان سازه می باشند.

#### ۴- توسعه الگوریتم های کنترلی نیمه فعال برای طراحی SATMD با سختی متغیر

الگوریتم ها و روش های متعددی در ادبیات فنی برای کنترل نیمه فعال پیشنهاد شده است [۲۹-۲۷]. در این بخش دو الگوریتم کنترل نیمه فعال برای تنظیم پارامتر سختی مکانیزم SATMD مطرح و توسعه یافته اند.

#### ۴-۱- الگوریتم کنترلی بهینه ی برشی<sup>۱</sup>

در این پژوهش با توجه به مفهوم قانون کنترل برشی، الگوریتم کنترلی نیمه فعال برای مکانیزم SATMD با سختی متغیر جهت کنترل نیمه فعال سازه های غیرخطی پیشنهاد شده است. در الگوریتم بهینه ی برشی، قانون کنترل از دو گام تشکیل شده است. گام اول با فرض وجود یک سیستم کنترل فعال ایده آل، شامل طراحی و توسعه یک الگوریتم کنترل فعال می باشد. گام بعدی شامل طراحی یک کنترل گر برشی است که به ابزار نیمه فعال این اجازه را می دهد تا با ایجاد تغییر در پارامتر سختی، نیروهای کنترلی که در حالت کنترل فعال بایستی به سازه وارد شود را تولید نماید.

در این پژوهش در گام اول از الگوریتم کنترل فعال توسعه یافته برای سازه های غیرخطی بر مبنای کنترل بهینه ی آنی<sup>۲</sup> که کارایی آن در سازه های با رفتار غیرخطی نشان داده شده است [۲۵] جهت تعیین نیروی کنترل فعال استفاده می شود.

<sup>1</sup> Clipped Optimal Control Algorithm (CO)

<sup>2</sup> Instantaneous Optimal Control

$\delta = 0.25$  و  $\gamma = 0.5$  انتخاب می‌شوند [۳۰].

#### ۴-۲- الگوریتم کنترلی تعادل اصلاح شده<sup>۱</sup>

الگوریتم کنترلی تعادل یکی از انواع الگوریتم‌های حرکتی همانند اسکای‌هوک<sup>۲</sup> و گراند‌هوک<sup>۳</sup> می‌باشد که بنابر وضعیت جرم میراگر شامل تغییرمکان و سرعت، میرایی ابزار نیمه‌فعال را تنظیم می‌کند. این الگوریتم کنترلی در پارامتری اوقات کنترل نسبی<sup>۴</sup> نیز خوانده می‌شود زیرا متغیرهای موجود در تابع شرطی، تغییرمکان نسبی و سرعت نسبی می‌باشند [۲۶]. در این پژوهش حالت باز- بسته این الگوریتم کنترلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. الگوریتم کنترلی تعادل برای تنظیم میرایی مطرح شده است و انتخاب میرایی در آن به این صورت می‌باشد که هنگامی که حاصلضرب دریافت TMD در سرعت نسبی آن مثبت باشد میرایی ابزار نیمه‌فعال برابر حداکثر میرایی انتخاب شده و در غیر اینصورت برابر حداقل میرایی انتخاب می‌گردد. در این پژوهش این الگوریتم کنترلی برای کنترل سختی توسعه یافته است. الگوریتم کنترلی تعادل اصلاح شده برای تنظیم سختی برای سازه‌های  $n$  طبقه‌ی مجهز به مکانیزم SATMD در طبقه‌ی آخر به صورت رابطه‌ی ۱۴ نوشته می‌شود:

$$k_d = \begin{cases} k_{\min} & (x_{n+1} - x_n) \times (\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n) \geq 0 \\ k_{\max} & (x_{n+1} - x_n) \times (\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n) < 0 \end{cases} \quad (14)$$

که در این رابطه  $x_{n+1}$  و  $\dot{x}_{n+1}$  به ترتیب تغییرمکان و سرعت TMD نسبت به زمین و همچنین  $x_n$  و  $\dot{x}_n$  به ترتیب تغییرمکان و سرعت طبقه‌ی آخر سازه نسبت به زمین می‌باشند.  $k_{\max}$  و  $k_{\min}$  به ترتیب حد پایین و حد بالای پارامتر سختی می‌باشند.

اساس این الگوریتم کنترلی به این صورت است که هنگامی که جابجایی و سرعت میراگر جرمی نسبت به طبقه‌ی آخر هر دو مثبت و یا هر دو منفی و به عبارت دیگر هم علامت باشند، سیستم کنترلی حد پایین پارامتر سختی را برای میراگر جرمی انتخاب می‌کند. از طرف دیگر هنگامی که جابجایی و سرعت میراگر جرمی نسبت به طبقه‌ی آخر در خلاف جهت هم و با علامت مخالف باشند، سیستم کنترلی حد بالای پارامتر سختی را برای میراگر جرمی انتخاب می‌کند.

#### ۵- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک<sup>۵</sup>، یکی از روشهای الهام گرفته شده از روند تکامل در طبیعت می‌باشد که برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی یک بردار طراحی به صورت یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود که ژن‌های آن همان متغیرهای ورودی مسئله است. شاخص برازندگی برای هر کروموزوم بر اساس مقدار تابع هدف آن سنجیده می‌شود. سه

#### ۴-۱-۲- تعیین پارامتر سختی

بعد از تعیین نیروی کنترلی ( $u(t)$ ) سختی  $k(t)$  طوری انتخاب می‌شود که حاصل ضرب  $k(t)x_{tmd}$  تقریباً برابر  $u(t)$  گردد. به عبارت دیگر سختی  $k(t)$  در هر گام به صورت زیر بدست می‌آید:

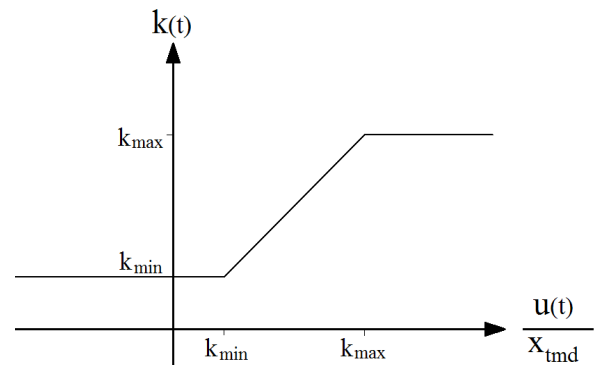
$$k(t) \cong \text{Sat} \left( \frac{u(t)}{x_{tmd}} \right); x_{tmd} \neq 0 \quad (11)$$

که تابع  $\text{Sat}$  بین دو مقدار  $k_{\min}$  و  $k_{\max}$  اشباع می‌گردد. از طرفی پارامتر سختی توسط ابزار نیمه‌فعال می‌تواند در طول مدت عملکرد ما بین حدود بالا و پایین ( $k_{\min}, k_{\max}$ ) تغییر کند.

$$k_{\min} \leq k(t) \leq k_{\max} \quad (12)$$

بنابراین با استفاده از شرط بالا پارامتر سختی در هر لحظه به صورت رابطه‌ی ۱۳ تعیین می‌شود که در شکل ۲ نیز نشان داده شده است.

$$k(t) = \begin{cases} k_{\min} & \frac{u(t)}{x_{tmd}} \leq k_{\min} \\ \frac{u(t)}{x_{tmd}} & k_{\min} \leq \frac{u(t)}{x_{tmd}} \leq k_{\max} \\ k_{\max} & \frac{u(t)}{x_{tmd}} \geq k_{\max} \end{cases} \quad (13)$$



شکل ۲: نحوه‌ی تغییرات مقادیر پارامتر سختی بر اساس قانون کنترل برشی

Fig.2. Variation of stiffness parameter value based on clipped control law

<sup>1</sup> Modified Balance Control Algorithm(MB)

<sup>2</sup> Skyhook

<sup>3</sup> Groundhook

<sup>4</sup> Relative control

<sup>5</sup> Genetic Algorithm (GA)

$\alpha$  و  $\beta$  مقادیر ثابت و  $Y_{max}$  حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه می‌باشد.

#### ۶-۲- مسئله‌ی بهینه‌سازی دوم

در این بخش به طراحی سیستم کنترل نیمه‌فعال بر اساس الگوریتم کنترلی تعادل اصلاح شده پرداخته می‌شود. با توجه به رابطه‌ی ۱۴، فرمان مناسب برای انتخاب سختی حداکثر یا حداقل در هر لحظه در یک حالت باز-سته به کنترل‌گر داده می‌شود. طراحی بهینه‌ی الگوریتم کنترلی تعادل اصلاح شده بر اساس انتخاب بهینه‌ی سختی حداکثر و حداقل ابزار نیمه‌فعال می‌باشد که با حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شوند.

مسئله‌ی بهینه‌سازی با تابع هدف حداقل کردن حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی سازه و عدم افزایش تغییرمکان نسبی TMD نسبت به طبقه‌ی آخر از مقدار حدی  $u_L$  به صورت روابط زیر تعریف گردیده است.

$$\text{Find } k_{min}, k_{max} \quad (18)$$

$$\text{Minimize } F(T) = \alpha Y_{max} + \beta \max[\cdot, g_1] \quad (19)$$

$$g_1 = \frac{x_{max}(tmd)}{u_L} - 1 \quad (20)$$

#### ۷- مطالعات عددی

جهت انجام مطالعات عددی برای بررسی قابلیت روش پیشنهادی در طراحی SATMD با سختی متغیر و همچنین کارایی این مکانیزم در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های غیرخطی، قاب ساختمانی هشت طبقه‌ی برشی [۳۴] مجهز شده به مکانیزم SATMD با سختی متغیر مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. برای سازه‌ی غیرخطی مورد مطالعه از رفتار هیستریسیس دوخطی مطابق شکل ۴ استفاده شده است. سختی الاستیک اولیه  $k_1 = 3/4 \times 10^5 \text{ kN/m}$  و سختی پس از تسلیم  $k_p = 3/4 \times 10^4 \text{ kN/m}$  می‌باشند. جرم و میرایی خطی به ترتیب  $m = 345/6 \text{ tons}$  و  $c = 734/3 \text{ kN.sec/m}$  یکسان برای طبقات و تغییرمکان جانبی نسبی تسلیم  $Y_y = 2/4 \text{ cm}$  در نظر گرفته شده است. برای طراحی SATMD از تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید<sup>۱</sup>  $(W(t))$  به عنوان یک زلزله‌ی مصنوعی که تاریخچه‌ی زمانی رکورد آن مطابق شکل ۵ می‌باشد، با بیشینه‌ی شتاب ارتعاش برابر  $PGA = 0.4/g$  استفاده شده است.

عملگر اصلی الگوریتم ژنتیک شامل انتخاب، تولید مثل و جهش می‌باشند [۳۱]. الگوریتم ژنتیک با تولید یک نسل موسوم به جمعیت اولیه آغاز می‌شود. سپس شاخص برازندگی را برای هر عضو از جمعیت ارزیابی می‌کند و شایسته‌ترین کروموزوم‌ها را برای تولید نسل بعد انتخاب می‌کند. با به کارگیری عملگر تولید مثل، اقدام به تولید نسل‌های جدید می‌کند که از نسلی به نسل بعد شایستگی جمعیت بهبود می‌یابد. الگوریتم ژنتیک به طور موفقیت‌آمیزی در کاربردهای مهندسی نظیر سیستم‌های کنترل سازه مورد استفاده قرار گرفته است [۳۲]. در این پژوهش پارامترها و عملگرهای مختلف الگوریتم ژنتیک بر اساس مرجع [۳۳] انتخاب شده است.

#### ۶- طراحی بهینه‌ی SATMD با استفاده از الگوریتم ژنتیک

برای طراحی بهینه‌ی مکانیزم SATMD با سختی متغیر لازم است پارامترهای سیستم کنترل نیمه‌فعال به طور بهینه انتخاب شوند. جهت ایجاد فرمان مناسب برای انتخاب سختی در هر لحظه لازم است الگوریتم متناسب با رفتار سیستم غیرخطی استفاده شود.

برای این منظور از دو الگوریتم کنترل بهینه‌ی آنی با استفاده از روش نیومارک و قانون کنترل برشی و همچنین الگوریتم کنترلی تعادل اصلاح شده استفاده می‌شود. در این پژوهش برای هر الگوریتم کنترلی مطرح شده یک مسئله‌ی بهینه‌سازی مجزا با تابع هدف حداقل کردن حداکثر پاسخ سازه تعریف شده که با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است.

#### ۶-۱- مسئله‌ی بهینه‌سازی اول

طراحی بهینه‌ی کنترل بهینه‌ی آنی و بهینه‌ی برشی بر اساس انتخاب بهینه‌ی پارامترهای سیستم کنترل از قبیل ماتریس‌های وزنی  $Q$  و  $R$  مربوط به محاسبه‌ی نیروی کنترلی و همچنین مقادیر حد بالا و پایین پارامتر سختی صورت می‌گیرد. جهت افزایش کارایی سیستم کنترل نیمه‌فعال، ماتریس‌های وزنی  $R, Q_1, Q_2, Q_3$  بر اساس روش ارائه شده توسط جغتایی و محبی [۲۵] تعیین گردیده است که پارامترهای فوق از حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی تعیین می‌شوند.

برای این منظور مسئله‌ی بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تابع هدف به صورت حداقل کردن حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی سازه و عدم افزایش تغییرمکان نسبی TMD نسبت به طبقه‌ی آخر از مقدار حدی  $u_L$ ، به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\text{Find } Q_1, Q_2, Q_3, k_{min}, k_{max} \quad (15)$$

$$\text{Minimize } F(T) = \alpha Y_{max} + \beta \max[\cdot, g_1] \quad (16)$$

$$g_1 = \frac{x_{max}(tmd)}{u_L} - 1 \quad (17)$$

<sup>1</sup> White noise(W(t))

۷-۱- کنترل غیرفعال با استفاده از مکانیزم TMD

در سازه‌های با رفتار غیرخطی، انتخاب هر مقداری برای پارامترهای TMD نمی‌تواند حالت بهینه داشته باشد، چرا که با شروع رفتار غیرخطی، TMD از حالت تنظیم شده خارج خواهد شد. در این پژوهش از پارامترهای TMD که به طور بهینه برای سازه غیرخطی مورد نظر تعیین شده‌اند، استفاده می‌شود. برای این منظور برای TMD با درصد جرمی‌های ۰/۳٪، ۰/۵٪، ۰/۷٪،  $\mu = 0.3\%$ ، سختی و میرایی همان مقادیر بهینه‌ی بدست آمده توسط محبی و جغتایی [۳۳] برای سازه‌ی غیرخطی مورد نظر تحت تحریک اغتشاش سفید، انتخاب می‌گردد که در جدول ۱ مقادیر مربوطه ارائه شده است.

مقادیر بهینه‌ی فوق بر اساس حداقل کردن حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی سازه بدست آمده است. در ادامه با متغیر نمودن پارامتر سختی TMDها، مکانیزم SATMD تشکیل می‌شود.

جدول ۱: مقادیر بهینه‌ی پارامترهای TMD برای سه درصد جرمی [۳۳]

Table 1. Optimum values of TMD parameters for three mass ratios [33]

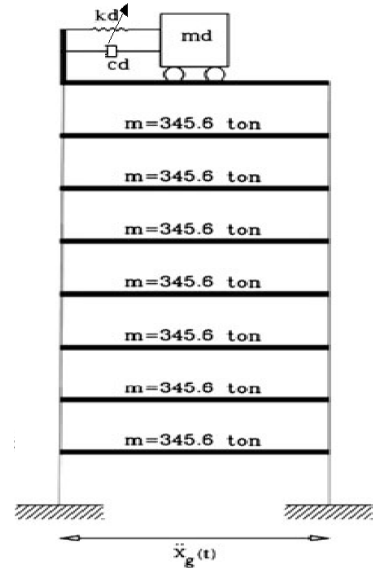
$\mu$ (%)	۰/۳	۰/۵	۰/۷
$m_d$ (ton)	۸/۲۹	۱۳/۸۲	۱۹/۳۵
$k_d$ (KN / m)	۲۱۳	۳۶۷	۵۶۱
$c_d$ (KN . s / m)	۵/۸۱	۱۰/۱۳	۱۷/۰۶

مقادیر حداکثر پاسخ‌های سازه‌ی کنترل نشده و سازه‌ی مجهز به TMD به ازای سه درصد جرمی در جدول ۲ آورده شده است. نتایج بدست آمده از تحلیل سازه کنترل نشده و کنترل شده با TMD به طور مناسبی منطبق با نتایج مرجع [۳۳] بوده که موید صحت مدل سازی و تحلیل‌های صورت گرفته می‌باشد. برای TMD با درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  بیشترین کاهش در حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی، تغییرمکان جانبی و شتاب سازه به ترتیب در حدود ۳۹/۱، ۲۴/۷ و ۱۰ درصد می‌باشد.

جدول ۲: حداکثر پاسخ سازه‌ی کنترل نشده و مجهز شده به TMD به ازای سه درصد جرمی تحت ارتعاش اغتشاش سفید

Table 2. Maximum responses of the uncontrolled structure and control structure equipped with TMD for three mass ratios under white noise excitation

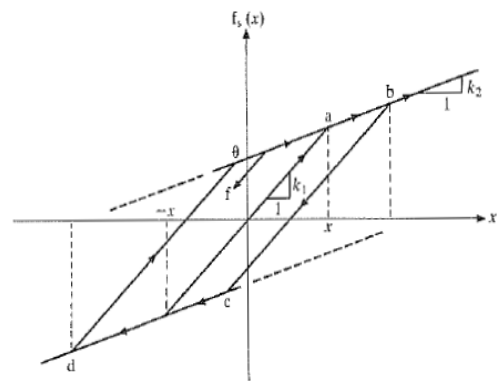
مکانیزم	حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی (mm)	حداکثر تغییرمکان جانبی (mm)	حداکثر شتاب ( $\text{mm/s}^2$ )
کنترل نشده	۴۷/۳	۱۷۲/۱	۸۵۶۷
TMD ( $\mu = 0.3\%$ )	۴۱/۶	۱۵۱/۷	۸۱۷۶
TMD ( $\mu = 0.5\%$ )	۳۵/۸	۱۳/۸۷	۸۱۰۷
TMD ( $\mu = 0.7\%$ )	۲۸/۸	۱۲۸/۵	۷۷۱۱



شکل ۳: قاب هشت طبقه‌ی برشی با رفتار هیستریسیس دوخطی مجهز به مکانیزم SATMD با سختی متغیر در طبقه‌ی آخر

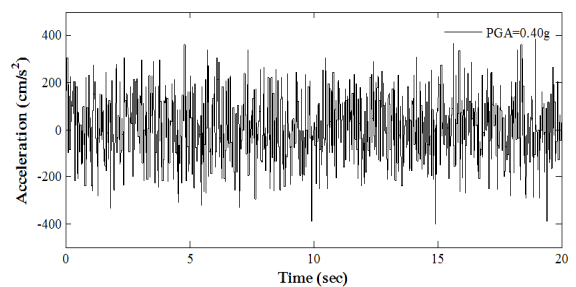
Fig.3. Eight-story shear-building frame with bilinear hysteresis behavior equipped with variable stiffness SATMD on top floor

لازم به ذکر است این ارتعاش به عنوان نمونه برای طراحی سیستم کنترلی استفاده شده است. بدیهی است برای طراحی سیستم کنترل نیمه‌فعال در هر منطقه می‌توان از رکورد ارتعاشی متناسب با محتوای فرکانسی زلزله‌های رخ داده در همان منطقه بهره گرفت.



شکل ۴: مدل رفتاری الاستو-پلاستیک دوخطی

Fig.4. Bilinear elasto-plastic behavior model



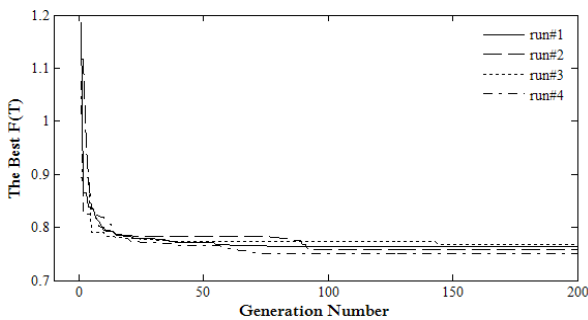
شکل ۵: تاریخچه‌ی زمانی ارتعاش پایه‌ی اغتشاش سفید

Fig.5. Time history of white noise ground motion

مقدار  $u_L = 1/5$  m به عنوان نمونه انتخاب شده که در محدوده‌ی کاربردی قابل قبول است ولی بدیهی است که اگر برای  $u_L$  مقادیر کمتری انتخاب شود عملکرد SATMD را تحت پوشش قرار می‌دهد.

مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده در معادلات ۱۵ تا ۱۷، دارای هشت متغیر بوده که شامل پارامترهای ماتریس‌های وزنی  $(q_1, q_2, q_3, q_{1m}, q_{2m}, q_{3m})$  و مقادیر حد بالا و پایین پارامتر سختی  $(k_{min}, k_{max})$  می‌باشد. از آنجاییکه بر اساس آنالیزهای عددی انجام گرفته پیش‌بینی می‌شود عملکرد SATMD وابسته به حد بالا و پایین پارامتر سختی باشد، با تعریف  $k_{min}$  و  $k_{max}$  به عنوان متغیرهای ورودی مسئله بهینه‌سازی سعی شد تا این مقادیر به طور بهینه تعیین شوند. به طوری که مقادیر متفاوت بدست آمده  $k_{min}$  و  $k_{max}$  برای درصد جرمی‌های مختلف نشان دهنده حساسیت عملکرد SATMD به بازه تغییر سختی می‌باشد.

مسئله‌ی بهینه‌سازی برای حداقل کردن حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه تحت تحریک اغتشاش سفید با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. نحوه‌ی همگرایی الگوریتم ژنتیک برای چهار بار حل مسئله به ازای درصد جرمی  $\mu = 0/7\%$  در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هر چهار بار حل (run) با سرعت همگرایی متفاوت به جواب بهینه‌ی یکسانی رسیده است. پارامترهای بهینه‌ی سیستم کنترل SATMD برای سه درصد جرمی مطابق جدول ۳ تعیین شده است.



شکل ۶: همگرایی الگوریتم ژنتیک در نسل‌های مختلف برای چهار بار حل مسئله‌ی بهینه‌سازی به ازای  $\mu = 0/7\%$

Fig.6. GA convergence toward optimum answer during generations for four runs of optimization problem for  $\mu = 0/7\%$ .

## ۷-۲- کنترل نیمه‌فعال با استفاده از مکانیزم SATMD با سختی متغیر

در این بخش به طراحی و ارزیابی عملکرد مکانیزم SATMD با سختی متغیر در کاهش پاسخ‌های سازه‌ی غیرخطی هشت طبقه‌ی مورد بررسی پرداخته می‌شود. مکانیزم SATMD با درصد جرمی‌های  $\mu = 0/3\%, 0/5\%, 0/7\%$  با پارامترهای  $m_d$  و  $c_d$  TMDهای بهینه (مطابق جدول ۱) و با سختی متغیر به صورت بازه‌ی زیر در نظر گرفته شده است.

$$k_{SA} = (k_{min}, k_{max}) \quad (21)$$

که در این رابطه  $k_{min}$  و  $k_{max}$  به ترتیب حد بالا و حد پایین پارامتر سختی می‌باشند.

## ۷-۲-۱- طراحی بهینه‌ی SATMD با الگوریتم بهینه‌ی برشی

طراحی سیستم کنترل نیمه‌فعال بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی در دو مرحله صورت می‌گیرد. بدین ترتیب که در هر گام ابتدا نیروی کنترلی مورد نیاز از رابطه‌ی ۹ محاسبه شده و با توجه به رابطه‌ی ۱۳ فرمان مناسب برای انتخاب مقدار سختی کنترل‌گر داده می‌شود. همچنین پارامترهای سیستم کنترل از جمله ماتریس‌های وزنی و حدود مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر سختی با توجه به مسئله‌ی بهینه‌سازی تعریف شده در روابط ۱۵ تا ۱۷ و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک انتخاب می‌شود. برای طراحی سیستم کنترل نیمه‌فعال یک کنترل‌گر در نظر گرفته شده لذا ماتریس  $R$  به صورت یک کمیت اسکالر می‌باشد که به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$R = r = 5 \times 10^{-7} \quad (22)$$

الگوهای مختلفی می‌تواند برای ماتریس‌های وزنی در نظر گرفته شود در این پژوهش به عنوان نمونه ماتریس‌های  $Q_1, Q_2, Q_3$  به صورت ماتریس‌های قطری زیر در نظر گرفته شده‌اند.

$$Q_1 = \begin{bmatrix} q_1 [I]_{8 \times 8} & [0]_{8 \times 1} \\ [0]_{1 \times 8} & q_{1m} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (1-23)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} q_2 [I]_{8 \times 8} & [0]_{8 \times 1} \\ [0]_{1 \times 8} & q_{2m} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (2-23)$$

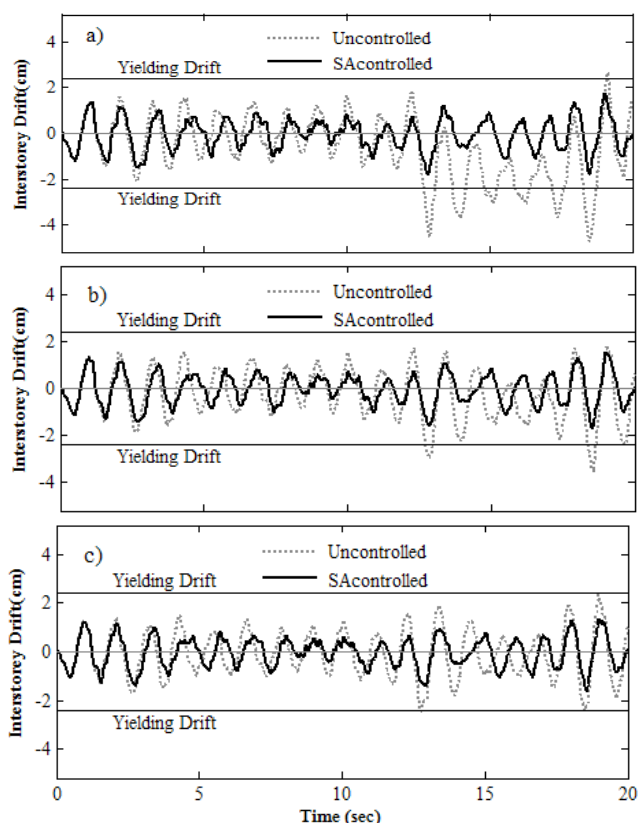
$$Q_3 = \begin{bmatrix} q_3 [I]_{8 \times 8} & [0]_{8 \times 1} \\ [0]_{1 \times 8} & q_{3m} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (3-23)$$

$\alpha$  و  $\beta$  به در روابط ۱۶ و ۱۹ به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$\alpha = \frac{1}{x_{yielding}} = \frac{1}{2.4 \text{ cm}}, \quad \beta = 200 \quad (24)$$



در اشکال ۷ و ۸ به ترتیب، تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان جانبی نسبی سه طبقه‌ی اول سازه و همچنین منحنی‌های هیسترسیس این طبقات در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده با مکانیزم SATMD با درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  با هم مقایسه شده‌اند. در شکل ۹ نیز تاریخچه‌ی زمانی تغییر پارامتر سختی میراگر جرمی نشان داده شده است. قابل توجه است که عملکرد مکانیزم SATMD به پارامترهایی نظیر مشخصات TMD  $(m_d, c_d)$  و همچنین مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر سختی  $(k_{min}, k_{max})$  بستگی دارد و نتایج فوق برای پارامترهای در نظر گرفته شده ارائه شده است.



شکل ۷: تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان جانبی نسبی سه طبقه‌ی اول سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده با مکانیزم SATMD به ازای درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی طبقات (a) اول، (b) دوم، (c) سوم

Fig.7. GA convergence toward optimum answer during generations for four runs of optimization problem for

$$\mu = 0.7\%$$

جدول ۳: مقادیر بهینه‌ی پارامترهای ماتریس‌های وزنی و مقادیر حد بالا و پایین پارامتر سختی برای سه درصد جرمی بدست آمده از الگوریتم ژنتیک

Table 3. Optimum values of weighting matrices parameters and upper and lower limit of stiffness parameter for three mass ratios determined by using genetic algorithm

$\mu$ (%)	۰/۳	۰/۵	۰/۷
$q_1$	$7/848 \times 10^{10}$	$3/623 \times 10^{10}$	$2/915 \times 10^{10}$
$q_2$	$5/837 \times 10^8$	$6/063 \times 10^8$	$5/137 \times 10^7$
$q_3$	$0/5176446$	$0/4728989$	$0/1614345$
$q_{1m}$	$792/28675$	$271/66225$	$329/83012$
$q_{2m}$	$642/42630$	$300/74737$	$401/04609$
$q_{3m}$	$96/296556$	$35/404367$	$1/1291445$
$k_{min} (KN / m)$	$175/78780$	$299/36004$	$458/02609$
$k_{max} (KN / m)$	$300/95409$	$503/14662$	$5342/0025$

مقادیر حداکثر پاسخ‌های سازه‌ی کنترل شده با مکانیزم SATMD بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی برای سه درصد جرمی تحت اثر ارتعاش پایه‌ی اغتشاش سفید  $(W(t))$  در جدول ۴ گزارش شده است.

جدول ۴: حداکثر پاسخ‌های سازه‌ی کنترل نشده و مجهز شده به SATMD بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی برای سه درصد جرمی تحت ارتعاش پایه‌ی اغتشاش سفید

Table 4. Maximum responses of the uncontrolled structure and controlled structure equipped with SATMD based on clipped optimal control algorithm for three mass ratios under white noise excitation

مکانیزم	حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی (mm)	حداکثر تغییرمکان جانبی (mm)	حداکثر شتاب (mm/s <sup>2</sup> )
کنترل نشده	۴۷/۳	۱۷۲/۱	۸۵۶۷
SATMD ( $\mu = 0.3\%$ )	۲۲/۳	۱۱۵/۳	۶۶۴۸
SATMD ( $\mu = 0.5\%$ )	۱۸/۶	۹۶/۶	۶۶۸۵
SATMD ( $\mu = 0.7\%$ )	۱۸/۰	۹۲/۲	۶۴۲۱

۴۲/۹ و ۴۵/۹ درصد و حداکثر شتاب سازه به ترتیب در حدود ۲۲/۴، ۲۱/۹ و ۲۵/۱ درصد کاهش یافته است.

۷-۲-۲ طراحی بهینه‌ی SATMD با الگوریتم تعادل اصلاح شده در این روش، مسئله‌ی بهینه‌سازی دارای دو متغیر یعنی مقادیر حد بالا و پایین پارامتر سختی TMD می‌باشد که در بازه‌های زیر در نظر گرفته شده است:

$$k_{\max} = (k_d, 0 \times k_d) \quad (25)$$

$$k_{\min} = (0.1 \times k_d, k_d) \quad (26)$$

با حل مسئله‌ی بهینه‌سازی، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقادیر بالا و پایین پارامتر سختی به ازای سه درصد جرمی مطابق جدول ۵ تعیین شده است:

**جدول ۵: مقادیر بهینه‌ی حد بالا و پایین پارامتر سختی برای سه درصد جرمی بدست آمده از الگوریتم ژنتیک**

Table 6. Optimum values of upper and lower limit of stiffness parameter for three mass ratios determined by genetic algorithm

$\mu$ (%)	۰/۳	۰/۵	۰/۷
$k_{\min} (KN / m)$	۲۰۸/۸۳۱۹۹	۳۵۸/۹۶۰۶۱	۴۹۳/۳۲۲۶۵
$k_{\max} (KN / m)$	۳۰۹/۱۷۹۱۹	۵۲۶/۱۹۲۵۲	۷۵۱/۵۸۹۴۰

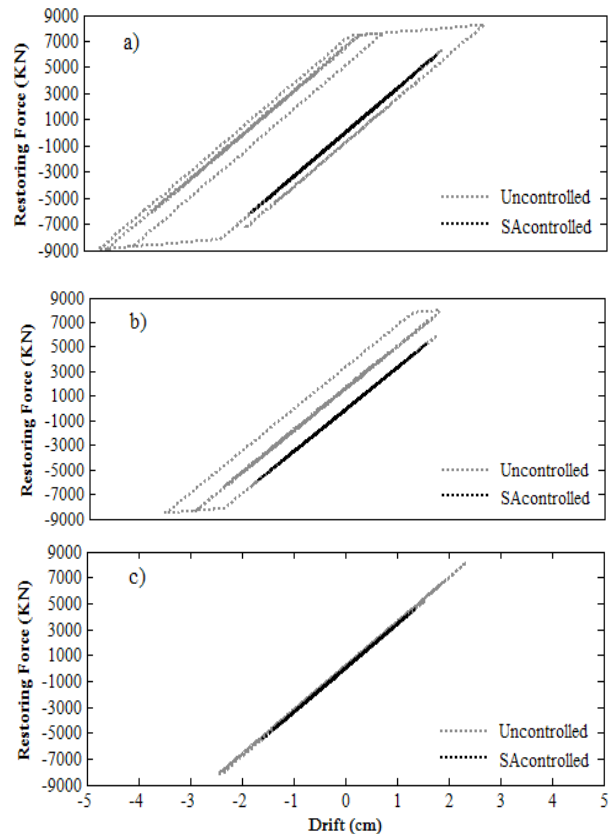
مقادیر حداکثر پاسخ‌های سازه‌ی کنترل شده با مکانیزم SATMD بر اساس الگوریتم تعادل اصلاح شده تحت اثر ارتعاش اغتشاش سفید برای سه درصد جرمی در جدول ۶ گزارش شده است.

**جدول ۶: حداکثر پاسخ‌های سازه‌ی کنترل نشده و مجهز شده به SATMD بر اساس الگوریتم تعادل اصلاح شده برای سه درصد جرمی تحت ارتعاش اغتشاش سفید**

Table 6. Maximum responses of the uncontrolled structure and equipped with SATMD based on modified balance control algorithm with three mass ratios under white noise excitation

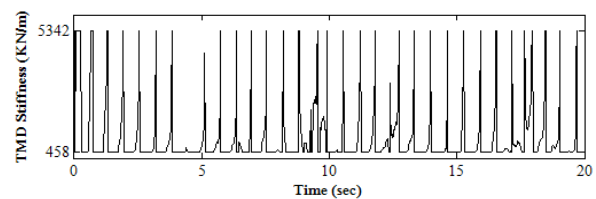
مکانیزم	حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی (mm)	حداکثر تغییر مکان جانبی (mm)	حداکثر شتاب (mm/s <sup>2</sup> )
کنترل نشده	۴۷/۳	۱۷۲/۱	۸۵۶۷
SATMD ( $\mu = 0.3\%$ )	۱۹/۴	۹۱/۰	۸۲۰۰
SATMD ( $\mu = 0.5\%$ )	۱۸/۳	۱۰۰/۱	۷۲۱۱
SATMD ( $\mu = 0.7\%$ )	۱۷/۵	۱۰۸/۲	۷۱۱۶

مکانیزم SATMD بر اساس الگوریتم کنترلی تعادل اصلاح شده با درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  بیشترین کاهش را در حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی، تغییر مکان جانبی و شتاب سازه به ترتیب در حدود ۶۳،



شکل ۸: منحنی هیسترسیس سه طبقه‌ی اول سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده با مکانیزم SATMD به ازای درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی. طبقات (a) اول، (b) دوم، (c) سوم

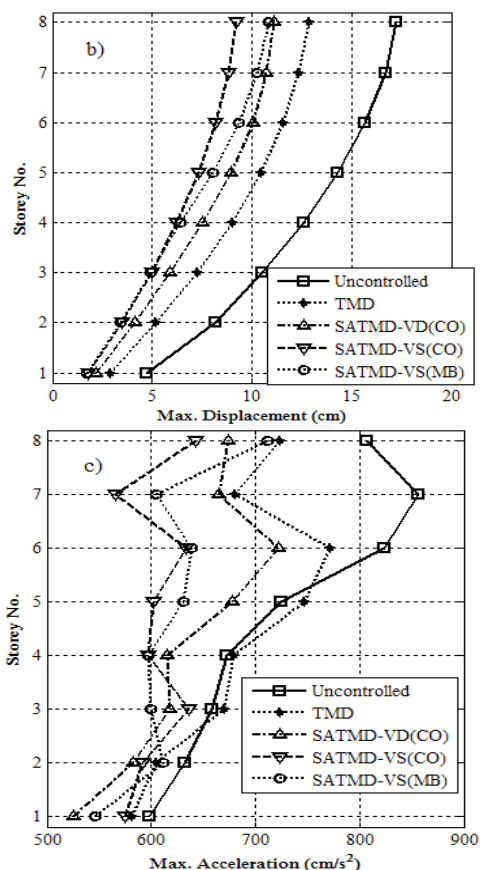
Fig.8. Hysteresis loops of uncontrolled and controlled structures by using SATMD and clipped optimal control when  $\mu = 0.7\%$  for : (a) first floor; (b) second floor; (c) third floor



شکل ۹: تاریخچه‌ی زمانی تغییر پارامتر سختی میراگر جرمی

Fig.9. Time history of stiffness variation of mass damper

نتایج نشان می‌دهد مکانیزم SATMD طراحی شده با روش پیشنهادی در کاهش تغییر مکان جانبی نسبی سازه عملکرد موثری داشته است. به طوری که حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه نسبت به حالت کنترل نشده، برای درصد جرمی‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷، به ترتیب در حدود ۵۲/۹، ۶۰/۷ و ۶۱/۹ درصد کاهش داشته است. همچنین می‌توان گفت که علی‌رغم اینکه در طراحی مکانیزم SATMD کاهش حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی (به عنوان معیار ایمنی و کاهش نیروهای داخلی) مد نظر بوده است، برای این سه درصد جرمی حداکثر تغییر مکان جانبی سازه به ترتیب در حدود ۳۲/۴،



شکل ۱۰: مقایسه‌ی (a) حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی، (b) حداکثر تغییرمکان جانبی و (c) حداکثر شتاب طبقات سازه‌ی کنترل نشده و سازه‌ی مجهز شده به TMD، SATMD، با میرایی متغیر بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی (VD-DMTAS) و SATMD و SATMD با سختی متغیر بر اساس الگوریتم‌های کنترلی بهینه‌ی برشی (VS-DMTAS) و تعادل اصلاح شده (VS-DMTAS) با درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  تحت ارتعاش اغتشاش سفید

Fig.10. Comparison of maximum (a) inter-story drift, (b) displacement, (c) acceleration of uncontrolled structure, controlled structures equipped with TMD, variable damping SATMD based on clipped optimal control (SATMD-VD(CO)) and variable stiffness SATMD based on clipped optimal control algorithm (SATMD-VS(CO)) and modified balance control algorithm (SATMD-VS(MB)) for  $\mu = 0.7\%$  under white noise excitation

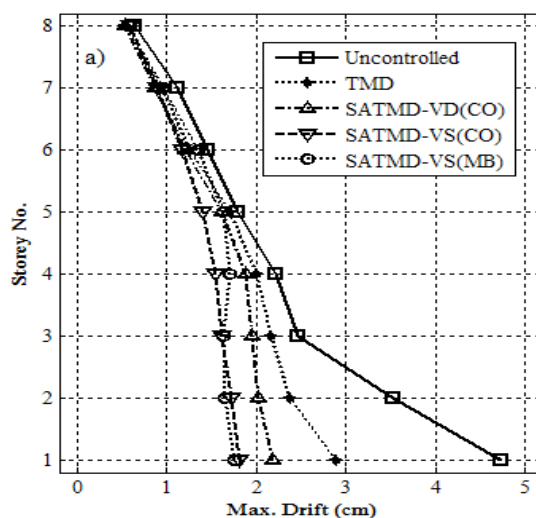
با توجه به مشخصات TMDهای غیرفعال، استفاده از مکانیزم SATMD به دلیل مشخصات تغییرپذیر این سیستم می‌تواند دامنه فرکانسی بیشتری را پوشش دهد. برای مقایسه بهتر حداکثر پاسخ‌های سازه‌ی مجهز شده به مکانیزم SATMD با سختی متغیر بر اساس هر دو الگوریتم کنترلی، مکانیزم SATMD با میرایی متغیر بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی و مکانیزم TMD با مقادیر مختلف برای سختی تحت اثر رکورد اغتشاش سفید در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با نیمه‌فعال نمودن مکانیزم غیرفعال TMD کارایی آن در سازه‌های غیرخطی بهتر می‌شود.

۳۶/۵ و ۱۶/۹ درصد از خود نشان داده است. مقایسه‌ی نتایج بدست آمده برای هر دو روش الگوریتم کنترلی نشان میدهد که هر دو روش در کاهش حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی عملکرد مشابهی داشته ولی الگوریتم بهینه‌ی برشی عملکرد مناسب‌تری نسبت به تعادل اصلاح شده، در کاهش شتاب سازه از خود نشان داده است.

### ۷-۳- ارزیابی کارایی مکانیزم TMD و SATMD با میرایی و سختی متغیر در کاهش پاسخ سازه‌های غیرخطی

در این بخش جهت ارزیابی بهتر عملکرد مکانیزم SATMD با سختی متغیر در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های با رفتار غیرخطی تحت اثر تحریک زلزله، کارایی مکانیزم TMD و مکانیزم SATMD با میرایی متغیر نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مقایسه شده است. پارامترهای TMD مطابق جدول ۱ به ازای درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  که برای سازه‌ی غیرخطی مورد بررسی تحت تحریک اغتشاش سفید تعیین شده‌اند، در نظر گرفته شده است. مکانیزم SATMD با میرایی متغیر با در نظر گرفتن جرم و سختی TMD مطابق جدول ۱ و متغیر نمودن پارامتر میرایی تشکیل می‌گردد که بر اساس الگوریتم کنترلی بهینه‌ی برشی برای سازه‌ی مورد نظر تحت ارتعاش اغتشاش سفید طراحی شده است.

در شکل ۱۰ به ترتیب حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی، حداکثر تغییرمکان جانبی و حداکثر شتاب طبقات مختلف تحت اثر ارتعاش اغتشاش سفید در حالت‌های استفاده از مکانیزم‌های مختلف میراگر جرمی با درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  نشان داده شده‌اند. با توجه به نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود مکانیزم SATMD با سختی متغیر بر اساس هر دو الگوریتم کنترلی عملکرد مناسب‌تر از مکانیزم‌های TMD و SATMD با میرایی متغیر نشان داده است.



متفاوت از زلزله طرح می‌باشند، در این بخش سازه‌ی کنترل شده با مکانیزم SATMD بر اساس هر دو الگوریتم کنترلی تحت اثر زلزله‌های تست با PGAهای مختلف قرار گرفته و حداکثر پاسخ‌های سازه برای حالت کنترل نشده و کنترل شده با مکانیزم‌های SATMD و TMD در جدول‌های ۸ تا ۱۰ گزارش شده است.

نتایج حاکی از آن است که مکانیزم SATMD بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی سازه (تابع هدف طراحی) را نسبت به سازه کنترل نشده تحت زلزله‌های تست به ازای درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  در حدود ۷ تا ۴۴ درصد کاهش داده است. این مکانیزم نیمه‌فعال بر اساس الگوریتم تعادل اصلاح شده نیز توانسته به ازای این درصد جرمی کاهش در حدود ۲ تا ۱۲ درصد در حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی سازه از خود نشان دهد. ملاحظه می‌شود که تحت اثر زلزله‌های تست، عملکرد SATMD با سختی متغیر بر اساس الگوریتم کنترلی بهینه‌ی برشی نسبت به الگوریتم تعادل اصلاح شده از دامنه کاهش بیشتری در تابع هدف طراحی برخوردار است. در هر دو الگوریتم مشاهده می‌شود که عملکرد SATMD وابسته به تحریک ورودی می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود برای عملکرد بهینه سیستم کنترل در هر منطقه، پارامترهای آن با توجه به مشخصات زلزله طرح آن منطقه و به صورت بهینه انتخاب شود.

همچنین مقایسه عملکرد مکانیزم‌های TMD و SATMD تحت زلزله‌های غیرطراحی نشان می‌دهد مکانیزم‌های TMD و SATMD تحت زلزله‌های غیرطراحی به واسطه رفتار غیرخطی سازه از حالت تنظیم خارج شده و نسبت به زلزله‌ی طراحی کارایی هر دو کاهش یافته است گرچه عملکرد SATMD تا حدی مناسبتر بوده است. با این حال پیش‌بینی می‌شود مکانیزم SATMD به دلیل مشخصات تغییرپذیر همچنان بتواند عملکرد مناسبی در کنترل ارتعاش سازه غیرخطی در مقابل ارتعاشات مختلف نشان دهد.

جدول ۷: حداکثر پاسخ‌های سازه‌ی کنترل نشده و سازه‌ی مجهز شده به TMD با سختی‌های مختلف  $k_d, k_{min}, k_{max}$  و SATMD با میرایی و سختی متغیر به ازای درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$  تحت ارتعاش اغتشاش سفید

Table 7. Maximum responses of the uncontrolled structure and controlled structure equipped with TMD for different stiffness of and SATMD with variable damping and variable stiffness for mass ratio,  $\mu = 0.7\%$  under white noise excitation

مکانیزم	حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی (mm)	حداکثر تغییرمکان جانبی (mm)	حداکثر شتاب ( $mm/s^2$ )
کنترل نشده	۴۷/۳	۱۷۲/۱	۸۵۶۷
TMD(kd)	۲۸/۸	۱۲۸/۵	۷۷۱۱
SATMD-VD(CO)	۲۱/۸	۱۱۱/۲	۷۲۱۷
TMD(kmin)	۳۷/۱	۱۴۰/۹	۸۱۲۷
TMD(kmax)	۴۹/۹	۱۹۳/۱	۹۰۲۲
SATMD-VS(CO)	۱۸/۰	۹۲/۲	۶۴۲۱
TMD(kmin)	۳۴/۹	۱۳۷/۹	۸۰۵۶
TMD(kmax)	۳۸/۸	۱۵۸/۸	۸۸۵۵
SATMD-VS(MB)	۱۷/۵	۱۰۸/۲	۷۱۱۶

۴-۷- بررسی عملکرد SATMD های طراحی شده تحت زلزله‌های تست در بخش‌های قبل مکانیزم کنترلی SATMD تحت ارتعاش خارجی اغتشاش سفید طراحی گردیده است. برای بررسی عملکرد مکانیزم SATMD تحت اثر زلزله‌های دیگر که به لحاظ شدت و محتوای فرکانسی

جدول ۸: حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی (drift)، حداکثر تغییرمکان جانبی (disp) و حداکثر شتاب (acc) سازه‌ی کنترل نشده، مجهز شده به مکانیزم TMD و SATMD بر اساس الگوریتم کنترلی بهینه‌ی برشی (CO) و تعادل اصلاح شده (MB) با درصد جرمی  $\mu = 0.7\%$

Table 8. Maximum inter-story drift (drift), maximum displacement (disp) and maximum acceleration (acc) of the uncontrolled structure and controlled structure equipped with TMD and SATMD based on clipped optimal (CO) and modified balance (MB) control algorithm for mass ratio,  $\mu = 0.7\%$

رکورد زلزله	PGA	کنترل نشده			TMD			SATMD (CO)			SATMD (MB)		
		drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )
Elcentro	۰/۳۵ g	۴۳/۴	۱۷۸	۱۰۵۰۲	۴۰/۲	۱۶۳	۱۰۱۳۴	۳۱/۸	۱۵۴	۹۸۸۳	۳۹/۹	۱۵۷	۹۷۳۳
Kobe	۰/۸۳ g	۹۷/۶	۳۰۰	۱۸۲۵۵	۹۵/۰	۲۹۲	۱۸۱۶۷	۹۱/۱	۲۸۹	۱۹۰۰۷	۹۴/۴	۲۹۲	۱۸۰۷۴
Parkfield	۰/۳۶ g	۲۶/۲	۱۱۴	۸۸۰۵	۲۳/۷	۱۰۴	۸۵۳۳	۲۰/۱	۹۵/۰	۷۸۸۲	۲۳/۳	۱۰۱	۸۳۹۸
Hachinohe	۰/۲۳ g	۳۸/۰	۱۵۹	۸۹۶۷	۳۱/۸	۱۵۲	۸۷۲۲	۲۱/۴	۱۳۱	۸۶۸۹	۳۳/۵	۱۵۲	۸۶۶۴
Naghan	۰/۷۲ g	۳۳/۲	۱۱۵	۱۳۰۱۰	۳۲/۵	۱۱۴	۱۲۹۶۸	۲۸/۴	۱۱۳	۱۲۶۳۰	۳۲/۶	۱۱۴	۱۳۰۱۰
Abbar	۱/۰۰ g	۳۵/۸	۱۷۱	۱۸۸۴۶	۳۴/۸	۱۶۳	۲۰۴۰۴	۲۹/۱	۱۳۱	۲۰۵۲۷	۳۳/۶	۱۵۶	۲۱۳۷۵

جدول ۹: حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی (drift)، حداکثر تغییرمکان جانبی (disp) و حداکثر شتاب (acc) سازه‌ی کنترل نشده، مجهز شده به مکانیزم TMD و SATMD بر اساس الگوریتم کنترلی بهینه‌ی برشی (CO) و تعادل اصلاح شده (MB) با درصد جرمی  $\mu = 0/5$

Table 9. Maximum inter-story drift (drift), maximum displacement (disp) and maximum acceleration (acc) of the uncontrolled structure and controlled structure equipped with TMD and SATMD based on clipped optimal (CO) and modified balance (MB) control algorithm for mass ratio,  $\mu = 0/5$  %

رکورد زلزله	PGA	کنترل نشده			TMD			SATMD (CO)			SATMD (MB)		
		drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )
Elcentro	۰/۳۵ g	۴۳/۴	۱۷۸	۱۰۵۰۲	۴۰/۵	۱۷۰	۱۰۳۰۲	۴۰/۸	۱۶۰	۱۰۲۳۷	۴۰/۳	۱۶۱	۹۹۳۶
Kobe	۰/۸۳ g	۹۷/۶	۳۰۰	۱۸۲۵۵	۹۶/۱	۲۹۴	۱۸۲۶۲	۹۵/۳	۲۹۲	۱۸۱۵۰	۹۵/۳	۲۹۳	۱۸۱۲۲
Parkfield	۰/۳۶ g	۲۶/۲	۱۱۴	۸۸۰۵	۲۴/۶	۱۰۷	۸۶۲۷	۲۳/۷	۱۰۶	۸۵۸۱	۲۳/۹	۱۰۴	۸۵۰۷
Hachinohe	۰/۲۳ g	۳۸/۰	۱۵۹	۸۹۶۷	۳۳/۱	۱۵۷	۸۷۷۶	۳۳/۴	۱۳۷	۸۸۳۷	۳۶/۴	۱۶۱	۸۷۵۱
Naghan	۰/۷۲ g	۳۳/۲	۱۱۵	۱۳۰۱۰	۳۲/۸	۱۱۴	۱۲۹۸۷	۳۲/۶	۱۱۴	۱۲۹۶۹	۳۲/۸	۱۱۴	۱۳۰۱۰
Abbar	۱/۰۰ g	۳۵/۸	۱۷۱	۱۸۸۴۶	۳۴/۵	۱۶۸	۱۹۸۷۹	۳۴/۱	۱۵۵	۲۰۵۰۷	۳۴/۵	۱۵۹	۲۰۹۸۴

جدول ۱۰: حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی (drift)، حداکثر تغییرمکان جانبی (disp) و حداکثر شتاب (acc) سازه‌ی کنترل نشده، مجهز شده به مکانیزم TMD و SATMD بر اساس الگوریتم کنترلی بهینه‌ی برشی (CO) و تعادل اصلاح شده (MB) با درصد جرمی  $\mu = 0/3$

Table 10. Maximum inter-story drift (drift), maximum displacement (disp) and maximum acceleration (acc) of the uncontrolled structure and controlled structure equipped with TMD and SATMD based on clipped optimal (CO) and modified balance (MB) control algorithm for mass ratio,  $\mu = 0/3$  %

رکورد زلزله	PGA	کنترل نشده			TMD			SATMD (CO)			SATMD (MB)		
		drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )	drift (mm)	.disp (mm)	.acc (mm/s <sup>2</sup> )
Elcentro	۰/۳۵ g	۴۳/۴	۱۷۸	۱۰۵۰۲	۴۲/۲	۱۷۴	۱۰۴۱۱	۴۱/۱	۱۶۷	۱۰۳۶۹	۴۱/۱	۱۶۹	۱۰۲۳۴
Kobe	۰/۸۳ g	۹۷/۶	۳۰۰	۱۸۲۵۵	۹۷/۳	۲۹۶	۱۸۳۱۱	۹۶/۴	۲۹۵	۱۸۲۴۱	۹۶/۸	۲۹۵	۱۸۲۱۲
Parkfield	۰/۳۶ g	۲۶/۲	۱۱۴	۸۸۰۵	۲۵/۲	۱۰۹	۸۷۰۲	۲۴/۵	۱۰۹	۸۶۶۹	۲۴/۸	۱۰۷	۸۶۲۲
Hachinohe	۰/۲۳ g	۳۸/۰	۱۵۹	۸۹۶۷	۳۸/۶	۱۵۷	۸۸۴۹	۲۷/۲	۱۳۸	۸۸۸۸	۴۲/۴	۱۶۸	۸۸۲۰
Naghan	۰/۷۲ g	۳۳/۲	۱۱۵	۱۳۰۱۰	۳۳/۰	۱۱۵	۱۲۹۹۷	۳۲/۹	۱۱۴	۱۲۹۸۶	۳۳/۰	۱۱۵	۱۲۵۰۱
Abbar	۱/۰۰ g	۳۵/۸	۱۷۱	۱۸۸۴۶	۳۵/۱	۱۷۰	۱۹۴۱۳	۳۵/۵	۱۵۸	۲۰۱۶۱	۳۴/۸	۱۶۸	۲۰۰۳۲

## ۸- نتیجه گیری

شده برای تنظیم سختی توسعه یافته است. به منظور ارزیابی بهتر کارایی مکانیزم میراگر جرمی تنظیم شده‌ی نیمه‌فعال در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های غیرخطی، عملکرد مکانیزم‌های میراگر جرمی تنظیم شده غیرفعال و نیمه‌فعال با میرایی متغیر نیز بررسی شده و نتایج با هم مقایسه گردیده است. برای آنالیز عددی، قاب برشی هشت طبقه‌ی تحت ارتعاش اغتشاش سفید قرار گرفته و با انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترهای میراگر جرمی (جرم و میرایی) به طراحی سیستم کنترل نیمه‌فعال با سختی متغیر پرداخته شده است. بر اساس تحلیل‌های عددی صورت گرفته می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم کنترل بهینه‌ی آنی با استفاده از روش عددی نیومارک می‌تواند با استفاده از مفهوم کنترل بهینه‌ی برشی برای سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال بسط داده شده و برای طراحی

در این پژوهش با هدف بررسی کارایی سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها در کاهش پاسخ سازه‌های با رفتار غیرخطی تحت اثر ارتعاش زلزله، عملکرد مکانیزم میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال با سختی متغیر بر روی سازه‌های غیرخطی برشی با رفتار دوخطی هیسترسیس مورد بررسی قرار گرفته است. مکانیزم میراگر جرمی تنظیم شده نیمه‌فعال با سختی متغیر از طریق جایگزین کردن فنر معمولی سیستم میراگر جرمی (TMD) با یک ابزار نیمه‌فعال تنظیم سختی (SAIVS) ایجاد شده است. جهت تعیین پارامتر سختی در هر لحظه، الگوریتم کنترل نیمه‌فعال بر اساس قانون کنترل بهینه‌ی برشی و الگوریتم کنترل بهینه‌ی آنی جهت کاربرد در سازه‌های غیرخطی توسعه داده شده است. همچنین الگوریتم کنترلی تعادل اصلاح

در کاهش پاسخها موفق تر می‌باشد. با این وجود، جهت افزایش کارایی SATMD پیشنهاد می‌شود که پارامترهای آن با توجه به مشخصات زلزله‌ی طرح هر منطقه به صورت بهینه انتخاب گردد.

### مراجع

- [1] B.F. Spencer, S. Nagarajaiah, State of the Art of Structural Control, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 129(7) (2003) 845-856.
- [2] G.B. Warburton, Optimum absorber parameters for various combination of response and excitation parameters, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 10(3) (1982) 381-401.
- [3] J.C.H. Chang, T.T. Soong, Structural control using active tuned mass dampers, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 106(6) (1980) 1091-1098.
- [4] Y. Ikeda, K. Sasaki, M. Sakamoto, T. Kobori, Active mass driver system as the first application of active structural control, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(11) (2001) 1575-1595.
- [5] J.Q. Sun, M.R. Jolly, M.A. Norris, Passive, adaptive and active tuned vibration absorber - A survey, *Journal of Mechanical Design*, 117(B) (1995) 234-242.
- [6] D. Hrovat, P. Barak, M. Rabins, Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control, *Journal of Engineering Mechanics*, 109(3) (1983) 691-705.
- [7] M. Abe, Semi-active tuned mass dampers for seismic protection of civil structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(7) (1996) 743-749.
- [8] M. Abe, T. Igusa, Semi-active dynamic vibration absorbers for controlling transient response, *Journal of Sound and Vibration*, 198(5) (1996) 547-569.
- [9] T. Kobori, M. Takahashi, T. Nasu, N. Niwa, K. Ogasawara, Seismic response controlled structure with active variable stiffness system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 22(11) (1993) 925-941.
- [10] J. Bobrow, F. Jabbari, K. Thai, A new approach to shock isolation and vibration suppression using a resettable actuator, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 122(3) (2000) 570-573.
- [11] J.N. Yang, J.H. Kim, A.K. Agrawal, Resetting semiactive stiffness damper for seismic response control, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 126(12) (2000) 1427-1433.
- [12] S. Nagarajaiah, D. Mate, Semiactive control of continuously variable stiffness system, in: 2nd World Conf. Struct. control, Kyoto, Japan, 1998, pp. 397-405.
- [13] S. Nagarajaiah, N. Varadarajan, Novel semiactive variable stiffness tuned mass damper with real time tuning capacity, in: 13th Engineering Mechanics Conf. ASCE, Reston, Va, 2000.
- [14] N. Varadarajan, S. Nagarajaiah, Wind response control

مکانیزم‌های نیمه‌فعال با سختی متغیر در سازه‌های غیرخطی به کار گرفته شود. همچنین این الگوریتم کنترلی عملکرد موثرتری نسبت به الگوریتم تعادل اصلاح شده در کاهش پاسخهای سازه از خود نشان داده است.

۲- از مطالعات عددی صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که جهت عملکرد مناسب مکانیزم میراگر جرمی نیمه‌فعال بایستی مقادیر حد بالا و پایین ابزار تنظیم سختی به طور مناسب انتخاب شود.

۳- روش پیشنهادی برای طراحی SATMD با سختی متغیر با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دلیل برخورداری از دقت و سرعت همگرایی بالا، روشی مناسب برای تعیین پارامترهای بهینه‌ی مکانیزم نیمه‌فعال می‌باشد.

۴- در این پژوهش با وجود اینکه تابع هدف برای طراحی بهینه‌ی SATMD، کاهش حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی سازه (به عنوان معیار ایمنی و کاهش نیروهای داخلی) بوده است، نتایج حاکی از آن است که در مقابل ارتعاش طرح و همچنین زلزله‌های تست، حداکثر تغییرمکان جانبی و حداکثر شتاب سازه (به عنوان معیار راحتی ساکنین) نیز کاهش داشته است. اگرچه میزان کاهش در آن‌ها کمتر از مقدار کاهش حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی است. به عنوان نمونه مکانیزم SATMD با سختی متغیر طراحی شده بر اساس الگوریتم بهینه‌ی برشی تحت زلزله طرح به ازای درصد جرمی ۰/۷ حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی سازه (تابع هدف طراحی) را نسبت به سازه کنترل نشده حدود ۶۲ درصد کاهش داده است. علاوه بر این حداکثر تغییرمکان جانبی سازه و حداکثر شتاب سازه را نیز به ترتیب حدود ۴۶ و ۲۵ درصد کاهش داده است.

۵- مقایسه عملکرد SATMD با سختی متغیر با TMD تحت زلزله‌های طراحی و تست نشان می‌دهد که استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده‌ی نیمه‌فعال به دلیل برخورداری از مشخصات تغییرپذیر می‌تواند جایگزین مناسبی برای TMD بخصوص در سازه‌های غیرخطی باشد. بطوریکه در مثال عددی این مقاله، مکانیزم SATMD نسبت به TMD حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی سازه را تحت زلزله طراحی به ازای درصد جرمی‌های ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ درصد به ترتیب حدود ۴۶، ۴۸ و ۳۸ درصد بیشتر کاهش داده است.

۶- مقایسه کارایی SATMD با سختی و میرایی متغیر نشان می‌دهد که در مثال عددی این مقاله SATMD با سختی متغیر عملکرد مناسب‌تری نسبت به SATMD با میرایی متغیر نشان داده است. به طوری که SATMD با سختی متغیر بر اساس الگوریتم بهینه برشی با درصد جرمی ۰/۷ حداکثر تغییرمکان جانبی نسبی، حداکثر تغییرمکان جانبی و حداکثر شتاب سازه را نسبت به SATMD با میرایی متغیر به ترتیب حدود ۱۷، ۱۷ و ۱۱ درصد بیشتر کاهش داده است.

۷- نتایج نشان می‌دهد در حالیکه عملکرد سیستم کنترلی SATMD در سازه‌های غیرخطی به مشخصات رکورد زلزله وابسته می‌باشد، با این حال سیستم SATMD نسبت به حالت TMD تحت اثر زلزله‌های تست

- [24] C.C. Chang, H.T.Y. Yang, Instantaneous optimal control of building frames, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 120(4) (1994) 1307-1326.
- [25] A. Joghataie, M. Mohebbi, Vibration controller design for confined masonry walls by distributed genetic algorithms, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 134(2) (2008) 300-309.
- [26] T. Sireteanu, D. Stancioiu, C.W. Stammers, Use of magnetorheological fluid dampers in semi-active driver seat vibration control, in: *ACTIVE, ISVR*, Southampton, UK, 2002.
- [27] S.J. Dyke, B.F. Spencer, A comparison of semi-active control strategies for the MR damper, in: *Proceedings of International Conference on Intelligent Information Systems*, Bahamas, 1997.
- [28] A.K. Carter, Transient motion control of passive and semiactive damping for vehicle suspensions, Master of science thesis in electrical engineering, University of Virginia, 1998.
- [29] Y.J. Cha, J. Zhang, A.K. Agrawal, B. Dong, Comparative studies of semiactive control strategies for MR dampers: pure simulation and real-time hybrid tests, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 139(7) (2013) 1237-1248.
- [30] K.J. Bathe, *Finite element Procedures*, New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1996.
- [31] D.E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc. Reading, Mass, 1989.
- [32] N.S. Hadi, Y. Arfiadi, Optimum design of absorber for MDOF structures, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 124(11) (1998) 1272-1280.
- [33] M. Mohebbi, A. Joghataie, Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(1) (2012) 57-76.
- [34] J.N. Yang, F.X. Long, D. Wong, Optimal control of nonlinear flexible structures, *Journal of Applied Mechanics*, 55(4) (1988) 931-938.
- of building with variable stiffness tuned mass damper using empirical mode decomposition/ hilbert transform, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 130(4) (2004) 451-458.
- [15] S. Nagarajaiah, N. Varadarajan, Short time Fourier transform algorithm for wind response control of buildings with variable stiffness TMD, *Engineering Structures*, 27(3) (2005) 431-441.
- [16] S. Nagarajaiah, E. Sonmez, Structures of semiactive variable stiffness/ multiple tuned mass dampers, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 133(1) (2007) 67-77.
- [17] S. Nagarajaiah, Adaptive passive, semiactive, smart tuned mass dampers: identification and control using empirical mode decomposition, Hilbert transform, and short-term Fourier transform, *Structural Control and Health Monitoring*, 16(7-8) (2009) 800-841.
- [18] C. Sun, R.P. Eason, S. Nagarajaiah, A.J. Dick, Hardening Duffing oscillator attenuation using a nonlinear TMD, a semi-active TMD and a multiple TMD, *Journal of Sound and Vibration*, 332(4) (2013) 674-686.
- [19] R.P. Eason, C. Sun, S. Nagarajaiah, A.J. Dick, Attenuation of a linear oscillator using a nonlinear and a semi-active tuned mass damper in series, *Journal of Sound and Vibration*, 332(1) (2013) 154-166.
- [20] C. Sun, S. Nagarajaiah, Study on semi-active tuned mass damper with variable damping and stiffness under seismic excitations, *Structural Control and Health Monitoring*, 21(6) (2014) 890-906.
- [21] S.J. Dyke, B.F. Spencer, M.K. Sain, J.D. Carlson, Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction, *Smart Materials and Structures*, 5(5) (1996) 565-575.
- [22] T. Pinkaew, Y. Fujino, Effectiveness of eemi-Active tuned mass dampers under harmonic excitation, *Engineering Structures*, 23(7) (2001) 850-856.
- [23] H. Ji, Y. Moon, C. Kim, I. Lee, Structural vibration control using semi-active tuned mass damper, in: *Proc Eighteenth KKCNN Symposium on Civil Engineering-KAIST6*, Taiwan, 2005.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

M. Mohebbi, S. Bakhshinezhad, "Designing Variable Stiffness Semi-Active Tuned Mass Damper for Nonlinear Structures". *Amirkabir J Civil Eng.*, 49 (2) (2017) 347-361.

DOI:10.22060/ceej.2016.7045

